

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРИЙНОГО ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Войтех А.А., Войтех В.А.  
 Институт электродинамики НАН Украины

Асинхронный двигатель в системах частотнорегулируемого электропривода получил широкое распространение благодаря своей простоте, надежности и сравнительно низкой стоимости, а благодаря использованию современной полупроводниковой техники можно добиться его хороших регулировочных характеристик и энергетических показателей.

Асинхронные двигатели в системах частотного управления применяются для решения сложных технологических задач в перерабатывающей, полиграфической и металлообрабатывающей промышленности, бытовой технике и многих других отраслях и сферах использования.

Серийные асинхронные двигатели разрабатываются и выпускаются в виде серий общего применения и их модификаций, для работы с неизменной частотой и скоростью вращения при вариации скорости в узком диапазоне. В этом диапазоне проектные электромагнитные нагрузки, энергетические показатели и электрические параметры, как правило, оптимальны. Специально разработанные частотнорегулируемые двигатели оптимизируются для более широкого диапазона частотного регулирования. Однако, как в первом, так и во втором случае оптимальные свойства частотноуправляемых двигателей в более полной мере могут быть реализованы за счет новых схемных решений и алгоритмов управления.

Таким образом, в разработке и применении электромеханических систем с частотноуправляемыми асинхронными двигателями определились два направления: разработка систем с использованием специально разработанных частотноуправляемых асинхронных двигателей и разработка систем с использованием серийных асинхронных двигателей.

Учитывая актуальность как первого, так и второго направления, рассмотрим особенности второго, наиболее массового.

Закон оптимального частотного управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором был разработан М.П.Костенко [1] и развит в ряде работ, опубликованных в дальнейшем [2, 3]. Важным показателем в работе частотнорегулируемого двигателя является кратность максимального, или опрокидывающего момента и возможность сохранить его в рассматриваемом диапазоне изменения частоты.

Воспользуемся выражением основного закона оптимального управления частотнорегулируемым двигателем [1]

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}} \sqrt{\frac{M_1}{M_{1н}}} \quad (1)$$

Выражение (1) представляет фундаментальный закон оптимального частотного управления с допущением отсутствия падения напряжения на активных сопротивлениях двигателя и линейности электромагнитных параметров. В связи с этим, как известно, используя соотношение (1), не удастся поддерживать электромагнитный момент на необходимом уровне, особенно в нижней части диапазона регулирования.

В качестве математической модели асинхронного частотнорегулируемого двигателя, работающего в установившемся режиме принята схема замещения с вынесенным на зажимы контуром намагничивания и электрическими параметрами, приведенными к неподвижному статору (рис.1) [1]. Учитывая, что инвертор преобразователя частоты с широтно импульсной модуляцией (ШИМ) собран на IGBT-модулях, несущая частота коммутаций может быть принята до 20 кГц, а алгоритм управления коммутацией обеспечивает на выходе практически синусоидальную кривую токов в обмотке статора двигателя, принимаем в расчетах напряжение на статоре двигателя синусоидальным. Нелинейностью электромагнитных параметров пренебрегаем.

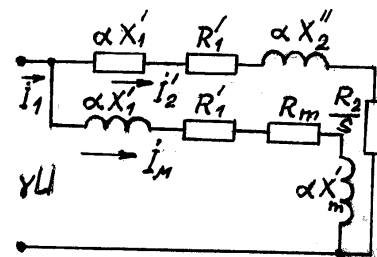


Рисунок 1 Схема замещения

Для получения оптимальной зависимости напряжения на выходе инвертора от частоты  $U(f)$  воспользуемся выражением максимального момента [1]

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1 \dot{U}_1^2}{4\pi f_1 \left[ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2} \right]} \quad (2)$$

Подставив номинальные и текущие значения максимального момента (2) в (1) и, приняв во внимание

зависимость реактивных сопротивлений от частоты

$$\frac{x_1}{x_{1H}} = \alpha, \text{ получим отношение напряжений } \gamma = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{1H}}$$

при  $R_1 \neq 0$ .

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{1H}} = \gamma = \alpha \sqrt{\frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_{кн} \cdot \alpha)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_{кн}^2}}}. \quad (3)$$

Из выражения (3) могут быть получены зависимости  $\gamma$  для трех основных видов нагрузочных моментов:

Для нагрузки с постоянным моментом:

$$\frac{M_1}{M_H} \approx \frac{M_{1max}}{M_{maxH}} = 1. \quad (4)$$

При  $R_1 = 0$  получаем известное соотношение:

$$\gamma = \alpha.$$

Для нагрузки вида "постоянная мощность",  $P_2 = const$

$$\frac{M_1}{M_H} \approx \frac{M_{1max}}{M_{maxH}} = \frac{f_{1H}}{f_1}. \quad (5)$$

После подстановки в (3) получим

$$\gamma = \sqrt{\frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_{кн} \cdot \alpha)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_{кн}^2}}}. \quad (6)$$

При  $R_1 = 0$  имеем:  $\gamma = \sqrt{\alpha}$ .

Для нагрузки типа вентиляторной

$$\frac{M_1}{M_H} \approx \frac{M_{1max}}{M_{1maxH}} = \left( \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2$$

имеем:

$$\gamma = \sqrt{\alpha^3 \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_{кн} \cdot \alpha)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_{кн}^2}}}. \quad (7)$$

При  $R_1 = 0$  имеем  $\gamma = \alpha^2$ .

Определим зависимость изменения напряжения  $\gamma(\alpha)$ , подведенного к статору при нагрузке вида  $M = const$  для двигателя 4A80L2Y3 мощностью 1,5кВт.

Относительные параметры схемы замещения для этого двигателя:  $x_{\mu} = 5,1$ ;  $R'_1 = 0,12$ ;  $x'_1 = 0,067$ ;  $R''_2 = 0,072$ ;  $x_k = 0,12$ .

Результаты расчета по (3) представлены на рис. 2 кривыми: 1 – при  $R_1 = 0$ ; 2 – при  $R_1 \neq 0$ .

Рассмотрим изменение максимального скольжения  $s_{max}(M_{max})$ .

Согласно [1] для относительного максимального скольжения имеем:

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}}. \quad (8)$$

Так как  $x_k = f(f_1)$ , для относительного скольжения получим:

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (x_{кн} \alpha)^2}}. \quad (9)$$

Нетрудно заметить, что относительное максимальное скольжение при  $R_1 = 0$  увеличивается пропорционально  $\alpha$ .

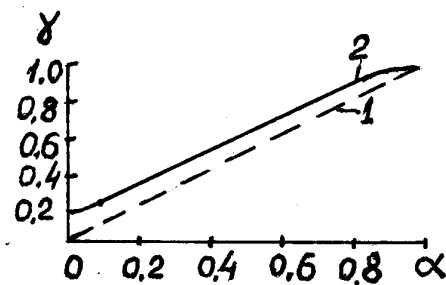


Рисунок 2 Зависимость  $\gamma(\alpha)$  для  $M_{max} = const$ : 1 – при  $R_1 = 0$ ; 2 – при  $R_1 \neq 0$

Полученные соотношения (3, 6, 7) обеспечивают необходимые величины перегрузочного момента в процессе частотного управления асинхронным двигателем для различных видов нагрузочного момента, однако остается неясным вопрос о тепловом состоянии двигателя. Для приближенной оценки теплового состояния рассмотрим электромагнитные потери, выделяемые в двигателе. Добавочными потерями пренебрегаем. Согласно П-образной схеме замещения, электрические потери описываются известными соотношениями:

$$P_{\Sigma} \cong I_{\mu}^2 (R_1 + R_M) + I_2'^2 (R_1 + r_2') = \frac{\dot{U}_H^2 \gamma^2 (R_1 + R_{мн} \cdot \gamma^2 \alpha^{1,5})}{(R_1 + R_{мн} \cdot \gamma^2 \alpha^{1,5})^2 + (x_{1H} + x_{мн})^2 \alpha^2} + \frac{\dot{U}_H^2 \gamma^2 (R_1 + R_2')}{\left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_{1H} + x_{2H}')^2 \alpha^2}. \quad (10)$$

Параметры  $R'$ ;  $R''_2$ ;  $x'_{1H}$ ;  $x''_{2H}$ ;  $x'_{мн}$ ;  $s_H$ ;  $\frac{M_{max}}{M} = m_{max}$  берем из каталога [4], а параметр  $R'_{мн}$  вычисляется по (11), в зависимости от частоты сети и магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя

$$R_{мн} = \frac{P_{стH}}{3I_{\mu H}^2}; \quad (11)$$

$$\text{где } P_{\text{стн}} \cong P_{\text{уд}} \cdot g \left( \frac{B_{\delta}}{B_{\delta n}} \right)^2; \quad P_{\text{уд}} = 3,3 \text{ Вт/кг};$$

$$R'_m = R_{\text{мн}} \gamma^2 \alpha^{1,5}.$$

При неизменной величине опрокидывающего момента величину скольжения  $s$  в диапазоне регулирования скорости представим как функцию  $s(K_m; s_{\text{max}})$ . Для этого удобно воспользоваться формулой Клосса в упрощенном виде:

$$\frac{M}{M_{\text{max}}} = \frac{1}{k_m} \approx \frac{2(1+s_{\text{max}})}{s_m} s. \quad (12)$$

Для токов ветвей П-образной схемы замещения при частотном управлении получим:

$$I'_2 = \frac{\dot{U}_1 \gamma}{\left( R_1 + \frac{R'^2}{s} \right) + j(x_1 + x'_2) \alpha}; \quad (13)$$

$$I_{\mu} = \frac{\dot{U}_1 \gamma}{\left( R_1 + R_{\text{мн}} \gamma^2 \alpha^{1,5} \right) + j(x_1 + x_m) \alpha}; \quad (14)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I} + \dot{I}_M. \quad (15)$$

Подставляя каталожные значения параметров [4] для двигателя 4A80L2У3 и значения  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $s$ ,  $R_{\text{мн}}$  – рассчитываются по (10), (13), (14), получим значения токов в ветвях по (13), (14), полный ток статора (15) и электромагнитные потери мощности (10), выделяемые в рабочем объеме машины. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

$\gamma$	1	0,87	0,66	0,55	0,37
$\alpha$	1	0,8	0,6	0,4	0,2
$I_1, \text{ А}$	3,25	2,72	2,55	2,6	2,75
$P_{\Sigma}, \text{ Вт}$	223	208	204	203	257

Из полученных данных видно, что потери в процессе частотного регулирования в диапазоне  $\alpha = 1 \div 0,2$  близки к номинальным потерям двигателя. Однако следует принять во внимание, что теплоотдача двигателя вследствие уменьшения скорости потока охлаждающего воздуха ухудшается, подчиняясь известному соотношению [5]

$$\alpha = 1,33 \left( 1 + 0,8 \sqrt{v} \right) 10^{-3}. \quad (16)$$

Изменение теплоотдачи двигателя для рассмотренного примера по отношению к номинальному режиму составит:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{1 + 0,8 \sqrt{v_H}}{1 + 0,8 \sqrt{v_H} \alpha}, \quad (17)$$

где  $v_H$  и  $v$  – скорость потока охлаждающего воздуха в номинальном режиме в нижней точке диапазона регулирования.

Для рассмотренного примера получим:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{1 + 0,8 \sqrt{3000}}{1 + 0,8 \sqrt{600}} = 2,25.$$

Выражение (17) может быть использовано для корректировки величины допустимых потерь в регулируемом двигателе при продолжительном режиме работы на нижней скорости, а также для расчета нового вентилятора для самовентилируемого двигателя.

Полученные соотношения (3), (6), (7), (10), (15) для  $\gamma$ , токов и потерь использованы для разработки алгоритмов управления серийными асинхронными двигателями при питании их от преобразователей частоты типа "Варимек", разработанных в Институте электродинамики НАН Украины. Эти преобразователи серийно выпускаются и установлены на многих предприятиях как Украины, так и за рубежом во многих видах технологического оборудования. Применение в этих преобразователях микропроцессорной системы управления на основе разработанных алгоритмов управления и силовых IGBT транзисторов позволило достичь относительно низкой стоимости и –высокой надежности, что подтверждается продолжительной производственной эксплуатацией преобразователей частоты типа "Варимек".

Выводы

1. Сравнение максимальных моментов дает возможность довольно просто определить величину напряжения для компенсации активного сопротивления статора для различных видов нагрузки.
2. При нагрузке  $M = const$  при регулировании вниз электромагнитные потери изменяются незначительно.
3. Существенная зависимость теплоотдачи двигателя при регулировании вниз ограничивает продолжительность работы двигателя в нижнем участке диапазона регулирования.
4. Улучшение теплоотвода в диапазоне регулирования может быть достигнуто за счет рационально спроектированного вентилятора самообдува.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. М.–Л. Госэнергоиздат, 1958. – 651с.
2. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М. – "Наука", 1966. – 297 с.
3. Загорский А.Е., Золотов М.Б. Автономный электропривод повышенной частоты. М. – "Энергия", 1973. – 184 с.
4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник /Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. – М. Энергоиздат, 1982. – 504 с.
5. Постников И.М. Проектирование электрических машин. Киев, Изд-во техн. литературы УССР, 1952 – 736 с.